第3章

はんだの接合性向上から
機械的ストレスに耐える基板を作る方法まで

製造容易性や機械的信頼性が高いプリント基板の設計テクニック 11連発

八甫谷 明彦

高い信頼性を誇る基板を作る際には，製造容易性や機械的信頼性が高いことが求められる．これらの条件を満たすためには，製造現場と設計現場の相互理解と連携が欠かせない．ここでは製造容易性や機械的信頼性を高めるためのプリント配線板設計テクニックを紹介する．（編集部）

プリント配線板は電子機器の心臓部であり，多数の電子部品によって構成されています．設計者にとってプリント配線板の設計は，電気的な特性を出すことがメインになりますが，電気的な特性以外にも製造容易性や機械的信頼性が非常に重要です．これらがおろそかになると，製造の歩留まりが悪くなったり，電子機器の寿命が見込みよりも短くなったりします．

このような損失を発生させないためにも，製造容易性や機械的な信頼性を考慮した設計が重要です．特に，製造が難しい高密度実装や，今まで以上に衝撃や発熱など機械的ストレスが加わる電子機器においては，プリント配線板設計のノウハウが必要不可欠となっています．

ここでは，製造容易性や機械的な信頼性を考慮したプリント配線板の設計や製造のポイントを紹介します．

図1　ウィッキング現象
はんだがICのリードへ吸い上げられる．

1 製造容易性を高める

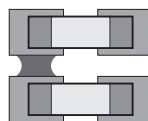
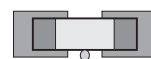
テクニック1 電子部品の熱容量を考慮しないと未はんだやチップ立ちが生じる

電子部品にはさまざまな種類があります．チップ部品やTSOP（thin small out-line package）などの小型，薄型の部品は，熱容量が小さく，リフローで温度が上がりやすいのですが，BGA（ball grid array）パッケージ（以降，BGA）やコネクタなどの大型で厚い部品は，熱容量が大きく，温度が上がりにくいという特徴があります．BGAは，はんだボールがグリッド上に配置された半導体パッケージです．

熱容量の異なる部品が混在して実装されると，リフロー中に部品の温度上昇に差があり，プリント配線板上での温度ばらつきが生じてしまいます．温度のばらつきが生じると，はんだの未溶融やはんだがICのリードへ吸い上げられるウィッキング現象（**図1**），チップ部品に見られるチップ立ちが発生します．

これらの不具合を防ぐためには，炉内の温度分布を均一化する高性能なリフロー炉の選定や，温度プロファイルの予熱時間内においてプリント配線板や各電子部品の温度ばらつきが最小となるように，リフロー炉の温度とコンベアの速度を調整することが求められます．

KeyWord
チップ立ち，ウィッキング現象，DFM，design for manufacturing，DRC，design rule check，ロバスト設計，ひずみゲージ，落下テスト，高加速寿命テスト，HALT，highly accelerated life test，電気系CAE，機械系CAE

図2
チップ部品のはんだ付けにおける不具合の例
設計や製造の条件が最適化されていないときに発生する.

(a) 実装ずれ　(b) ショート　(c) はんだボール　(d) チップ立ち

テクニック 2
チップ立ちは製造だけの責任ではない，配線パターンで防ぐべし

図2にチップ部品のはんだ付けにおける不具合の例を示します．これらの製造不具合は，どれ一つとってもさまざまな原因があり，設計や製造の条件が最適化されていないために発生します．

図2(d)に示したチップ立ちを例に説明します．チップ立ちは，チップ抵抗やチップ・コンデンサが立ち上がり，片側だけがはんだ付けされる現象で，回路的にはオープンになります．まるで墓石が立っているようなので，ツームストン現象と呼ばれています．また，高層ビルのようにも見えるのでマンハッタン現象とも呼ばれています．

チップ立ちのメカニズムは複雑ですが，**図3**のような解析モデルがあります．チップの片側だけがはんだ付けされた場合は，チップを下げようとするモーメントa，bと，持ち上げようとするモーメントcが作用します．$c > a + b$であればチップ立ちが発生し，$c < a + b$であれば発生しません．

チップ立ちが発生する原因の一つは，前述のプリント配線板上での温度ばらつきによって，一つの部品内ではんだが凝固するタイミングが異なることが考えられます．また，クリームはんだの印刷ずれ，チップ部品の実装ずれによるチップ部品の電極とはんだの接触面積の減少，つまりクリームはんだとの粘着力の低下も原因の一つになります．

そのほかに，フット・プリントの設計で左右の形状が異なったり，片側だけにべたパターンが配置されて熱伝導が異なることが挙げられます．

このように多くの不良原因が挙げられ，製造だけでなく，設計も関係することが少なくありません．

図3　チップ立ちの解析モデル
$c > a + b$であればチップ立ちが発生し，$c < a + b$であれば発生しない．

テクニック 3
試作の初期から設計部門と製造部門が密接に連携し，作りやすさを追求する

設計者は仕事量が多く，納期に追われることが多々あると思います．「製造まで考えて，設計をするべき」と頭で理解していても，対応が後回しになることがあります．しかし，製造容易性への配慮が欠けている場合は，歩留まりや生産性の低下を招き，製造に大きな打撃を与えてしまいます．

今までは製造容易性にある程度マージンがあり，歩留まり向上活動は製造部門に任せておけば，ある程度まで歩留まりを良くすることができました．しかし，高密度設計や高い品質レベルを狙う際には，製造部門だけの活動では限界があります．

プリント配線板への部品の表面実装の品質にかかわる要因としては，**表1**に示すように設計と製造に関することがあります．これらの要因は独立しておらず，相互に密接に関係しており，単独では品質を高められません．このようなことから，設計者は製造における作りやすさと生産性を追求するためのDFM(design for manufacturing)をしっかり実践していくことが大切です．

DFMは全体として考えてみれば，試作のやり直しが減り，製造の歩留まりが良くなり，結果的に製造コストが下がることにより，利益を生み出すことができます．設計や製造，それぞれでは達成できない全体最適化で大きな効果を得ることが可能です．

DFMを実践していくには，早い段階から設計部門と製造部門が密接に連携して，過去の不具合や製造ノウハウを分析します．そして，効果のある改善項目を早期段階で設計に盛り込み，最終的にはCAD(computer aided design)によるDRC(design rule check)に展開し，設計した内容

表1　プリント配線板への部品の表面実装において，品質に影響を与える要因
設計者は製造における作りやすさと生産性を追求するためのDFMをしっかり実践していくことが大切．

設計パラメータ	製造パラメータ		
	はんだペースト印刷	部品搭載	リフローはんだ付け
●プリント配線板 ランド・サイズ ソルダ・レジスト・サイズ ソルダ・レジスト精度 ランド表面処理 材質 反り量 部品間隔 ●部品 部品サイズ 電極表面処理 電極ピッチ 材質	●クリームはんだ 組成、粒径、フラックス, 粘土、チキソ性 ●メタル・マスク 厚み 開口サイズ，開口精度 製造方法 ●印刷機 スキージ材質，形状，角度 印刷スピード，印圧 ギャップ 版離れ速度 クリーニング 印刷精度	●マウンタ 吸着高さ 吸着力 搭載スピード 押し込み量 搭載精度 ノズル形状	●リフロー炉 予備加熱　温度 予備加熱時間 はんだ溶融温度 はんだ溶融時間 ピーク温度 冷却時間 温度勾配 雰囲気

が設計基準を満足しているか自動的に確認できるようにする必要があります．

テクニック4　歩留まりや修理のしやすさも考慮する，時には修理しないことを前提にする

高密度化設計では，部品間隔をできるだけ狭くしたいと設計者は考えます．現状の部品を搭載するマウンタの精度は非常に高くなっており，チップ部品を例にとると，0.1 mm未満の間隔でも実装が可能です（**図4**）．

はんだの短絡やオープンといった不良，または部品自体が不良の際の修理には，はんだごてやホット・エアーによる局所加熱を用います．その際に，あまりにも部品間隔が狭いと，修理できないことがあります．修理をすることを考慮する場合は，ある程度部品間の距離を確保した設計が必要です．ところが，修理をすることを前提とした設計をあまりにも追及すると，今度は高密度実装ができなくなり，製品仕様を満たせないトレードオフが発生します．

どうしても製品仕様を満たすためには，修理をしないことを前提に設計，製造するという選択もあります．修理をしないということは，歩留まりを上げて不良を作らないという，高い工程能力が求められます．高い工程能力を出すためには，歩留まりに関係する要因の影響度やばらつきを考慮したロバスト設計[注1]や製造が欠かせません．

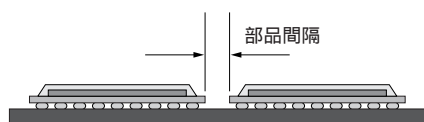



図4　部品と部品の間隔を狭くしたい
現状の部品を搭載するマウンタの精度は非常に高くなっており，チップ部品を例にとると0.1mm未満の間隔でも実装が可能．

テクニック5　表面と裏面の部品搭載時間を同じにする

歩留まりに関するもう一つの例に，実装機の実装時間バランスがあります．プリント配線板の両面に実装部品が搭載される際には，表面は表面の専用ライン，裏面は裏面の専用ラインで製造します．表面部品の総搭載時間と裏面部品の総搭載時間が異なると，総搭載時間が短い面のラインが早く終わってしまい，全体を考えると生産効率が悪くなってしまいます．

理想的には表面と裏面の部品搭載時間が同じであれば，生産に無駄はありません．表面と裏面の搭載時間のバランスについては，部品によって搭載時間が異なる点や電気設計や構造設計面も考慮して，部品配置の設計段階で最適化することがポイントとなります．

2　機械的な信頼性を高める

テクニック6　コネクタの抜き差し，キーボードの打鍵など機械的ストレスを考慮する

最近，電子機器には今まで以上に機械的ストレスが加わるケースがあります．**図5**はプリント回路基板に加わる機械的ストレスの例です．製造時，プリント回路基板のきょ

注1：「ロバスト」とは頑健さのこと．製品の設計誤差，物性値の変化などさまざまなパラメータのばらつきが製品の機能に及ぼす影響を設計段階から推定して押さえ込み，欠陥が生じない，安定した特性を得られるように配慮する設計のこと．

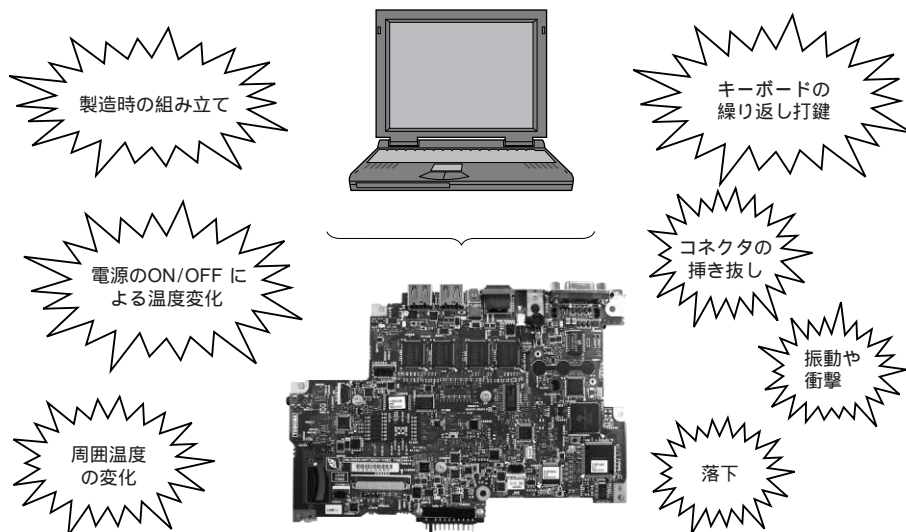



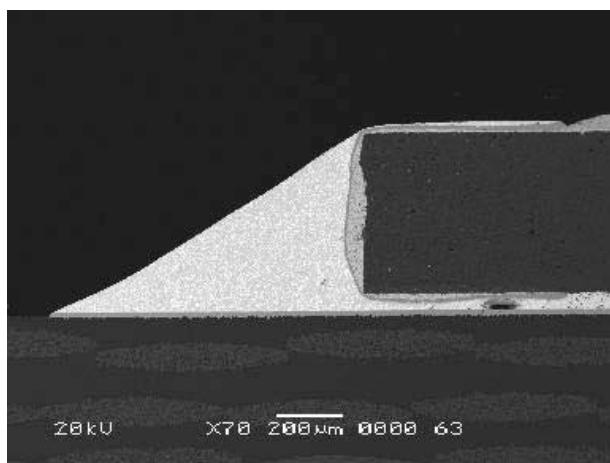
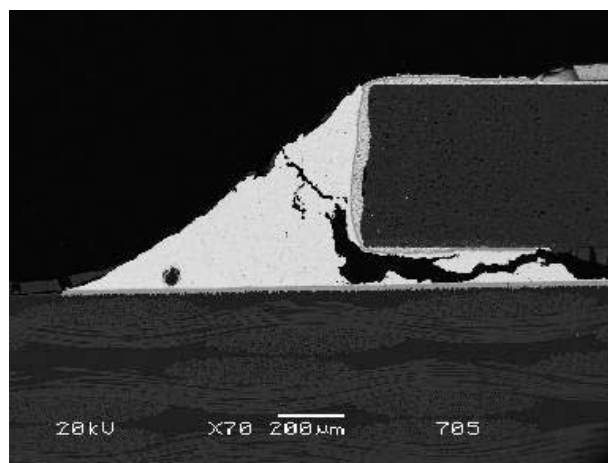
図5
プリント回路基板に加わる機械的ストレスの例
市場ではさまざまな使い方をされる．機械的信頼性を考慮した設計が求められている．

(**a**) 初期状態

(**b**) 温度サイクル後

写真1　プリント配線板に実装されているチップ部品の断面
(b)は温度サイクルによりチップ部品とプリント配線板の熱膨張差が生じたため発生．

う体への取り付け，キーボードの繰り返し打鍵，コネクタの抜き差し，振動，衝撃，落下，電源のON/OFFによる温度変化などが挙げられます．このような機械的ストレスは，心臓部であるプリント配線板にも伝わって，ダメージを受ける場合があり，電子部品，プリント配線板，はんだ接合部が破損すると電子機器の動作に大きな影響を与えます．

写真1は温度サイクルによってはんだ付け部が破損した例です．(**a**)はプリント配線板に大型のチップ部品が搭載され，はんだ付けされている断面です．(**b**)は温度変化により，チップ部品とプリント配線板の熱膨張差に起因してはんだ接合部に繰り返し熱応力が発生し，疲労によって破断した断面です．

テクニック 7 プリント回路基板に加わる力はひずみゲージで把握できる

携帯電話やノート・パソコンなどは，ユーザによる持ち運びが頻繁に行われるため，製品やプリント回路基板に加わる外力の影響を考慮した信頼性評価を行う必要があります．外力によるプリント回路基板へのダメージを検証する手段として，ひずみ測定の手法があります．この手法は，きょう体に外力が加わったときに，プリント回路基板がどの程度変形したかを定量的に把握できます．

この測定については，まず予備テストにより，プリント回路基板が破損しないひずみ量の限界値を把握します．続いて試作プリント回路基板において，**写真2**のようにBGA

写真2
BGAの近傍に
ひずみゲージをはり付ける

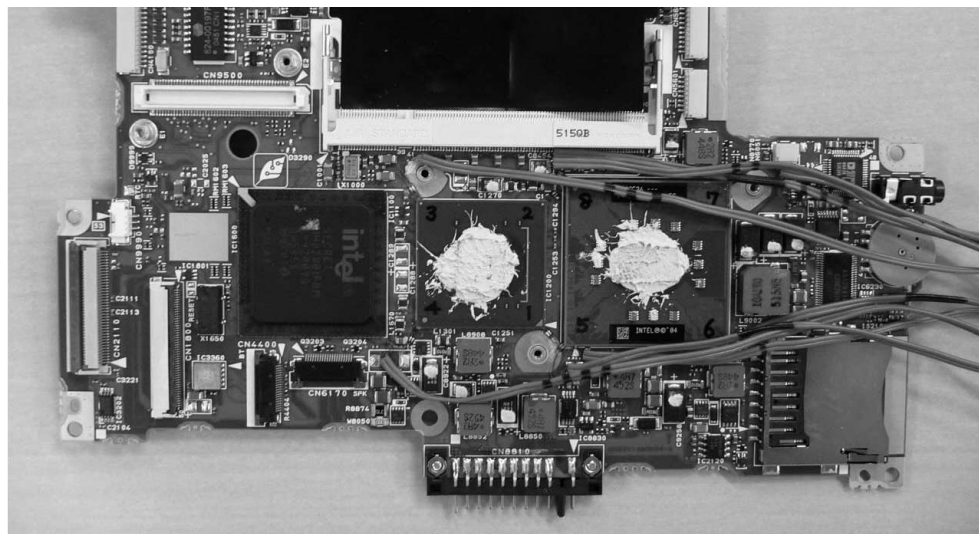



写真3　ひずみゲージを貼り付けたプリント回路基板が搭載された機器を落下させる

の近傍にひずみゲージをはり付け，製品に組み込んだ状態で落下テストなどにより外力を加え，プリント回路基板のひずみ量を測定します（**写真3**）．このひずみ量と先に把握した限界値との比較を行い，プリント回路基板の設計や製造に改善が必要か必要でないかを判断しています．

このような手法は，製造工程におけるプリント回路基板への負荷についても利用できます．プリント回路基板にひずみゲージを取り付け，どの工程でどの部分にどれだけの負荷が加わっているかを調査し，負荷の大きい工程の作業方法などについて見直し，きめ細かな改善を行います．例えば**写真4**のように，BGAが機械的ストレスに耐えるために，BGAのコーナ部に接着剤を塗布し，はんだ接合部に加わるひずみを低減して信頼性を確保しています．

テクニック 8　高加速寿命テストを行い内在する弱点を短時間で把握する

そのほかの機械系製品評価として，振動テスト，衝撃テスト，自由落下テスト，こん包・落下テスト，外圧力テスト，熱衝撃テストなど，多岐にわたるテストがあります．また，最近では品質レベルをさらに上げるために，これらのテストに加えて，高加速寿命テスト（HALT：highly accelerated life test）があります．

HALT（**写真5**）は，ランダムに発生する強力な振動や急激な温度変化などが同時に起こる過酷な環境をつくりだし，高レベルのストレスをかけることで，製品に内在する弱点を短時間で抽出できます．このテストを実施することによって，あらかじめ故障要因となりうる弱点を徹底的に洗い出し，製品の設計・製造にフィードバックすることができます．また，本体はもちろん，プリント配線板，部品なども含めたシステム全体の品質テストが可能です．

テクニック 9　シミュレータや解析装置を導入し，開発期間の短縮，低コスト化に生かす

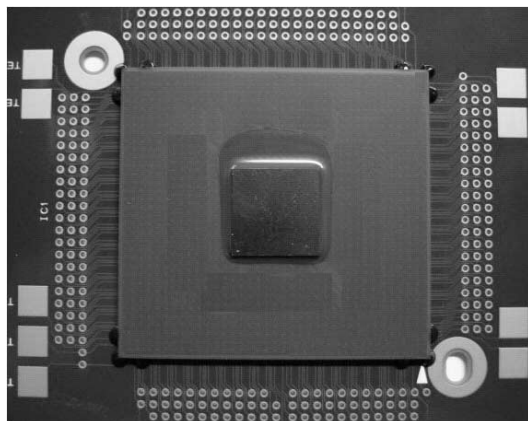
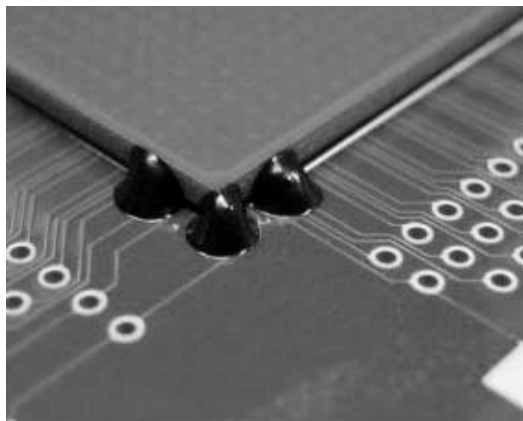
電子機器は顧客ニーズの変化や市場環境の変化が速く，付加価値のある製品をタイムリーに市場に投入することが

(a) 全体

(b) (a)の一部を拡大

写真4　BGAとプリント配線板の間に接着剤を塗布
はんだ接合部に加わるひずみを低減して信頼性を確保している．

写真5　高加速寿命テスト（HALT）試験機
米国QualMark社の製品．

求められます．また，製品には低コスト，高品質が求められており，開発期間の短縮に加え，低コスト化や高品質化を常に考えて設計，開発を進めなければなりません．

製品開発段階でのプリント配線板は，最後に仕様が決まって，最初に評価をしなければならないものです．構想設計→回路設計→パターン・レイアウト設計→プリント配線板製造→部品実装の開発段階で不具合が発生すれば，いずれかの工程に後戻りすることになり，試作回数が増えます．高密度プリント配線板や設計難易度が高いプリント配線板は，なおさらその可能性が高くなります．

開発期間の短縮，後戻り設計の撲滅，試作回数の削減のために，電気系CAE（computer aided engineering；コンピュータによる工業製品の設計・開発工程の支援）だけでなく，機械系CAE使ったシミュレーション技術の導入が必要不可欠となっています．

シミュレーション技術を導入することにより，早期設計段階で実験だけではできない事前検証ができます．また，評価段階でテスト項目や試料数の絞り込みが可能です．そのほかにも，不具合が発生したときの解析力が向上し，原因をスピーディに追究する際にも役立ちます．

テクニック10　はんだ接合の信頼性確認に構造解析シミュレーションを利用

機械的信頼性を考慮したプリント回路基板設計では，主にはんだ接合の信頼性について，構造解析シミュレーションと実際の実装評価を組み合わせて設計を行っています．

電子機器の高性能化と共に半導体部品の発熱量も増加しており，機器のON/OFFに伴う温度変化も増える傾向にあります．その一方，電子機器の軽量，薄型，高機能化により，高密度実装技術が採用され，はんだ接合部は，狭ピッチ化，微細化が進んでいます，その結果，電子部品とプリント配線板の熱膨張差に起因して，はんだ接合部に繰り返し発生する熱応力も大きくなる傾向があります．このよう

(a) BGAの接合部
(b) BGAのはんだ接合部のひずみを計算
(c) 寿命の推定

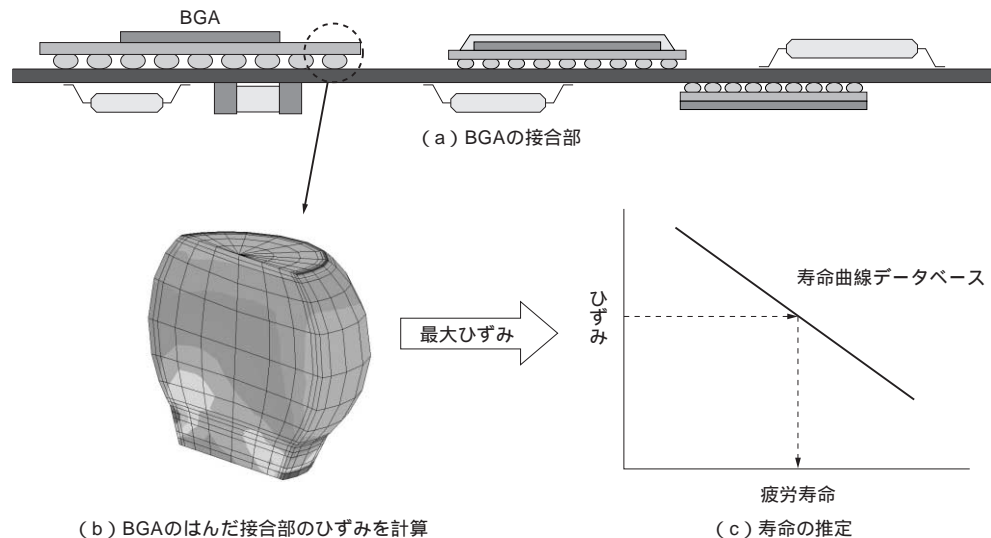



図6
BGAのはんだ接合部の寿命を解析
ひずみ分布の解析および，ひずみと熱膨張繰り返し数の寿命曲線データベースから，はんだの亀裂発生までの疲労寿命を推定．

な熱応力によるはんだ接合部の疲労寿命を把握することは，製品設計や製品保証の上で必要不可欠となっています．

その一つの手法として，構造解析シミュレーションを応用した例を示します．**図6**に示すように，BGAのはんだ接合部におけるひずみ分布の解析および，ひずみと熱膨張繰り返し数の寿命曲線データベースから，はんだの亀裂発生までの疲労寿命を推定します．もし，疲労寿命が製品仕様を満たさない場合は，設計にフィードバックし，はんだ付け部のフット・プリントおよび，はんだ量の見直し，プリント基板の冷却などを検討します．

テクニック 11 リフロー・シミュレーションを利用し，プリント配線板や部品の温度分布や反り量を把握

プリント配線板で機械系CAEを活用したもう一つの例として，リフロー・シミュレーションがあります．

図7はBGAがリフロー内で反り，はんだボールがつぶれ，短絡した事例です．このようにBGAやプリント配線板をリフロー炉で加熱したときの反りが，はんだ付けの品質に大きく影響します．そこで，**図8**のようなリフロー・シミュレーションを用いて，BGAやプリント配線板がリフローはんだ付けでどのような反りの振る舞いをするか把握しています．

リフロー・シミュレーションでは，プリント配線板や部品の温度分布，反り量を把握します．リフロー・シミュレーションは，リフローの温度プロファイルと同じような加熱，冷却が模擬できます．その際に，レーザー変位やモアレ干渉の解析装置を使えば，BGAやプリント配線板の反りの振る舞いを把握できます．個々に得られたBGAとプリント配線板の反りの振る舞いを重ね合わせ，反り量がBGAはんだボールの短絡などといった不具合の原因となるかを判定します．

不具合が発生するような反り量を超えた場合は，
- BGAについては材料，BGAボール径やBGAボールの平たん度
- プリント配線板についてはフット・プリントや層構成，部品配置，パターン密度
- 製造条件としてはリフロー・プロファイルや反り防止治具

などを見直し，短絡などの不具合が発生しないようにしています．

＊　＊　＊

製品の低コスト化に対応するため，ものづくりが日本から海外にシフトするなかで，「日本が生み出せる価値」はいったい何かを原点に戻り考えてみると，「高品質，高信頼性」が大きな差異化のための技術になると思います．

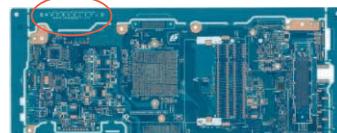
高品質，高信頼性を目指すためには，製造と設計の連携を密にし，DFMや信頼性を考慮した設計が欠かせません．DFMはdesign for manufacturingですが，製造容易性を向上し，品質を上げることは，最終的にはdesign for moneyにつながる，価値ある活動になるでしょう．

Column　次工程はお客様，不良を流さない

品質管理において有名な言葉の一つに，「次工程はお客様」があります．次工程とは，自分の仕事結果を受け取る，または自分の仕事が影響を与える人や部門のことです．この言葉は，たとえ社内であっても，自分の工程は次工程に対して責任を持ち，次工程の立場を理解し，次工程が満足することを常に考え対応することであり，結果的に生産性の向上が図れ，品質の良いものづくりにつながります．つまり，前工程から不良品を受け入れず，自分の工程で不良品を作らず，次の工程へ不良品を流さないということが基本となります．

工程と言うと製造部門のイメージになりますが，このことは製造部門内の話だけでなく，すべての部門の間で言えることです．DFMは設計部門が製造部門をお客様として考え，ものづくりがしやすい設計にし，歩留まりを向上させ，品質を上げていく活動です．

写真Aのように，プリント配線板の捨て板[注A]に，「私は不良を出しません」と文字印刷をしている例を紹介します．プリント配線板は回路が固まり次第，CADでレイアウト設計をしますが，そのとき「私は不良を出しません」という文字を入れます．プリント配線板製造部門や部品実装部門，製品組み立て部門で，この文字を目にすることになります．多くの人がこの文字を目にして「私は不良を出さない」という意識を持つことに役立てています．

写真A
捨て板部分に「私は不良を出しません」と印刷されたプリント配線板

また，**写真A**の通り，最近の国際化に対応して，少し表現は違いますが，世界で多く使われている英語と中国語でも表現しています．海外の製造拠点の人と話をするときにも，この言葉をきっかけに品質に対するディスカッションが始まり，品質の意識向上に一役買っています．

注A：部品実装の装置に投入する際に，プリント配線板を四角形にしておく必要がある．捨て板とは，四角形の形状にするための補助部分．最終的には切り離して捨てる．

3

図7
BGAがリフロー内で反り，はんだボールがつぶれ，短絡した事例
BGAやプリント配線板をリフロー炉で加熱したときの反りが，はんだ付けの品質に大きく影響する．

図8　リフロー・シミュレーションの結果
リフローはんだ付けの際にBGAやプリント配線板がどのように振る舞うのかを把握する．

参考文献

(1) 原悟ほか；設計の後戻りを削減する実装基板の仮想設計技術，東芝レビュー，vol.58，no.7，pp.7-10，2003年．
(2) 前原洋一郎ほか；鉛フリーはんだ実装技術，東芝レビュー，vol.59，no.1，pp.50-55，2004年．
(3) 中島雄二ほか；Thin & Light PCの薄型・軽量化技術，東芝レビュー，vol.60，no.8，pp.6-10，2005年．
(4) 酒井雄一ほか；富士通のものづくり革新，FUJITSU，vol.56，no.6，pp.506-513，2005年11月．
(5) 松村唯伸ほか；鉛フリーはんだによるアセンブリ技術，FUJITSU，vol.56，no.6，pp.545-551，2005年11月．
(6) 大澤直；はんだ付け技術ナゼナゼ100問，pp.102-104，2005年，工業調査会．

はっぽうや・あきひこ
(株)東芝　PC&ネットワーク社

<筆者プロフィール>
八甫谷明彦．東芝 PC＆ネットワーク社 PC開発センター 実装開発センター所属．現在，ノートPCやハード・ディスクなどディジタル機器のプリント配線板，実装技術の開発および物理化学分析，環境負荷分析に従事している．